

Oberflächenstruktur des Photokatalysators. Dissertation. Hannover: Universität Hannover; 1997.

[4] Pitre, S. ; Yoon, T. ; Scaiano, T. : Titanium Dioxide Visible Light Photocatalysis: Surface Association Enables Photocatalysis with Visible Light Irradiation. In: Chem. Commun., Nr. 53, S. 4335—4338.

[5] Wedler, G.; Freund, H.-J.: Lehrbuch der Physikalischen Chemie. 7. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. – ISBN 9783527346110.

[6] Pichat, P. (Hrsg.) ; Lu, M. (Hrsg.): Photocatalysis and waterpurification. Weinheim: Wiley VCH Verlag GmbH Co. KgAa, 2013. – ISBN 9783527331871.

[7] Köhler M., Weis N., Zorn C. Luftgetragene PAK-Belastungen in Innenräumen – Vorkommen, Quellen und Bewertung. Bericht; 2004.

[8] Ad-hoc Arbeitsgruppe Innenraumluftverunreinigungen. Richtwerte für naphthalin und naphthalinähnliche Verbindungen. Bundesgesundheitsblatt; 56:1448–1459, 2013.

[9] TRGS 900, BArBl Heft 1/2006 S. 41-55 Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2019 S. 117-119 [Nr.7] (v. 29.03.2019).

[10] Verein Deutscher Ingenieure. VDI Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD), Polychlorierte Dibenofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Berlin: Beuth Verlag; 1997.

[11] Amai H, Novoselac A. Experimental study on air change effectiveness in mixing ventilation. Build Environ. 2016; 109:101–111.

Vergleichende dynamische Bildanalyse mittels FlowCam® zur Bestimmung der Anzahl von entstehenden Partikeln während des Wasserkochens in verschiedenen Wasserkochern

Michael Toni Sturm, Sven Kluczka, Axel Wilde, Katrin Schuhen

Abstract

In vielen Kunststoff-enthaltenen Alltagsprodukten werden durch mechanische, thermische oder sonstige Einflüsse kleinste Kunststoff-Partikel generiert und gelangen auf verschiedenen Transportwegen in die Umwelt. Diese Partikel haben nicht nur eine lange Lebensdauer, sondern können im Ökosystem nur sehr langsam abgebaut werden. Schädigungen von Mensch und Tier sind möglich, wenn Partikel beispielsweise über die Nahrung aufgenommen werden. Anhand von Wasser-Untersuchungen vor und nach dem Aufkochen in Kunststoff-basierten Wasserkochern im Vergleich zu einem Glaswasserkocher wurden die Anzahl entstehender Partikel bestimmt. Die Ergebnisse werden in diesem Paper diskutiert

1 Einleitung

Viele Alltagsgegenstände bestehen teilweise komplett oder in Teilen aus Kunststoffen (Umweltbundesamt 2017). Während der private und gewerbliche

Endverbrauch von Kunststoffen als „reines“ Kunststoffprodukt (z.B. Verpackung) oder als Teilkomponente eines Systems (z.B. Automobil) 2015 in Deutschland noch ca. 12,06 Mio. t, stieg der Wert 2017 bereits auf ca. 14,3 Mio. t (Consultic et al. 2016, Hüthig GmbH 2017, Conversio Market & Strategy GmbH 2018). Weltweit sind ähnliche Anstiege in Produktion und Verarbeitung von Kunststoffen zu verzeichnen (Abbildung 1). Der am häufigsten hergestellte und verarbeitete Kunststoff ist neben Polypropylen, Polyethylen, das beispielsweise in Plastiktüten oder Mülltonnen steckt (PlasticsEurope 2016). Kunststoffe entstehen durch spezielle chemische Verfahren. Einer der wichtigsten Rohstoffe ist dabei das Erdöl. Je nach Zutaten und Begleitumständen dieser chemischen Verfahren kann der Kunststoff am Ende verschiedene Eigenschaften haben, die reichen von elastisch, hitzebeständig bis hin zu bruchfest (PlasticsEurope 2016). Wenn Kunststoffe Abbaureaktionen eingehen, entsteht Mikroplastik,

welches neben der allgemeinen Vermüllung durch Plastik derzeit eines der größten und meist diskutierten Umweltprobleme darstellt (Law and Thompson 2014). Seit dem Start der Massenproduktion von Plastik in den 1950ern ist es kaum noch aus dem Alltag wegzudenken (Geyer et al. 2017, PlasticsEurope 2016). Betrachtet man den Abbauprozess von Kunststoffen, so fallen mehrere Abbauewege auf (Barnes, D. K. A. et al. 2009, Jambeck et al. 2015, Wright et al. 2013). Der Abbau von Polymeren kann durch Wärme (thermischer Abbau), Sauerstoff (oxidativer und thermisch-oxidativer Abbau), Licht (Photoabbau), Witterungseinflüsse (im Allgemeinen UV/Ozonabbau) induziert werden. Polymere bauen sich während ihrer Lebensdauer kontinuierlich ab bzw. wandeln sich um. Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine stetige Abnahme der (mechanischen) Eigenschaften, die durch Änderungen des Molekulargewichts und der Molekulargewichtsverteilung und der Zusammensetzung des Polymers verursacht werden. Andere mögliche Änderungen umfassen Bindungsspaltung, -bruch, Farbveränderungen, Rissbildung und Gewichtsverlust.

Übrig bleiben nach diesem langsamen Umwandlungsschritt Kunststoffteile, die kleiner als 5 mm sind. Diese werden als Mikroplastik definiert (Eriksen et al. 2014, Eerkes-Medrano et al. 2015).

Mikroplastik gelangt über die Nahrungskette oder durch Kontamination der Atemluft in den

menschlichen Organismus (Wright and Kelly 2017, Revel et al. 2018, Prata 2018, Lusher et al. 2017). Die Persistenz von Mikroplastik in Kombination mit steigenden Plastik- und Mikroplastikeinträgen in die Umwelt sowie der stetigen Fragmentierung von bereits in die Umwelt eingetragenen Plastik, führen zu einer immer höheren Belastung der Umwelt und somit auch der Menschen. Verschiedene Untersuchungen konnten bereits zahlreiche schädliche Effekte von Mikroplastik auch auf den menschlichen Organismus nachweisen (Galloway et al. 2017, Wright and Kelly 2017).

Bisher fehlen fundierte Aussagen darüber, ab welcher Aufnahmemenge ein Gesundheitsrisiko für den Menschen besteht. Dabei muss neben verschiedenen Größen der Polymerpartikel auch ihre chemische Zusammensetzung und deren Verhalten im Körper/Organismus betrachtet werden. Mikroplastik wurde bereits in zahlreichen Nahrungsmitteln wie Meersalz, Honig, Zucker oder Bier nachgewiesen. Untersuchungen von Trinkwasser ergaben eine geringe Kontamination von wenigen Partikeln pro Kubikmeter (Varianz zwischen 0,4 bis 7 Partikel/m³) (Liebezeit and Liebezeit 2013, 2014, Iñiguez et al. 2017, Mintenig et al. 2014). In Kunststoffflaschen gelagertes Trinkwasser zeigte mit durchschnittlich 325 Partikeln/m³ und maximal über 10000 Partikeln/m³ eine deutlich höhere Verunreinigung (Mason et al. 2018). Wie sich die Partikelentstehung und Belastung

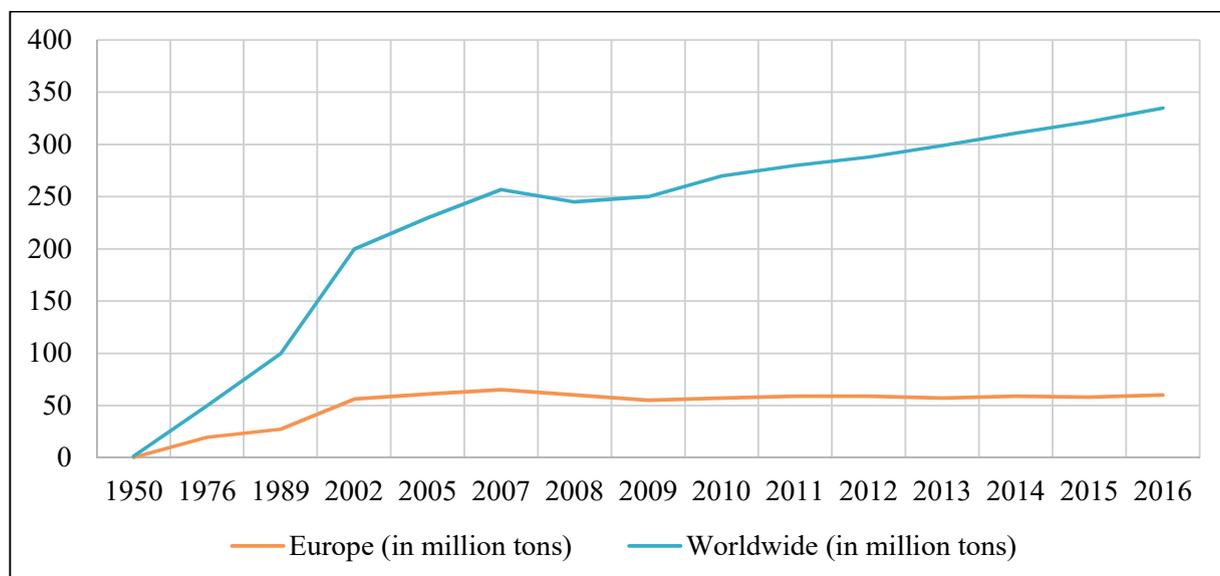


Abbildung 1: Weltweite und europäische Produktionsmenge von Kunststoff in den letzten Jahren von 1950 bis 2016 in Mio. t (CHEManager 2018, Statista 2018).

in Alltagsgegenständen darstellt, wurde anhand des Wasserkochens in Wasserkochern aus Kunststoff und Glas experimentell erarbeitet und im Nachgang ausgewertet.

2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden vier Wasserkocher aus Kunststoff (Polyethylen, Polypropylen) von vier unterschiedlichen Herstellern getestet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der getesteten Geräte.

Tabelle 1: Übersicht der getesteten Wasserkocher aus Plastik

Hersteller	Modell	Fassungsvermögen
Emerio	WK-108992	1 Liter
Philips	HD4646	1,5 Liter
Braun	Multiquick 3	1,7 Liter
OK.	OWK 103-W	1,7 Liter

Zum Vergleich wurde neben den Wasserkochern aus Plastik auch ein Modell aus Glas (ohne Kunststoffbestandteile) getestet (Tabelle 2).

Tabelle 3: Beschreibung der Prozedur zur erstmaligen Inbetriebnahme der Wasserkocher nach Bedienungsanleitung

Hersteller	Inbetriebnahme (nach Bedienungsanleitung)
Emerio	Der Wasserkocher wurde bis zum angegebenen Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden drei Kochvorgänge durchgeführt, ohne das Wasser zwischendurch zu wechseln. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
Philips	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurde ein Kochvorgang durchgeführt. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
Braun	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden zwei Kochvorgänge durchgeführt. Zwischen den beiden Kochvorgängen wurde das Wasser ausgetauscht und anschließend entsorgt.
OK.	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden drei Kochvorgänge durchgeführt, ohne das Wasser zwischendurch zu wechseln. Anschließend wurde das Wasser entsorgt.
CIATRONIC	Der Wasserkocher wurde bis zum Maximum mit partikelfreiem Wasser gefüllt. Mit dem Wasser wurden drei Kochvorgänge durchgeführt. Zwischen den drei Kochvorgängen wurde das Wasser ausgetauscht und anschließend entsorgt.

Tabelle 2: Übersicht des getesteten Wasserkochers aus Glas

Hersteller	Modell	Fassungsvermögen
CIATRONIC	WKS 3641	1,5 Liter

Für alle Messungen wurde partikelfreies Wasser verwendet, welches laut Herstellerangaben nach VDE 0510 entmineralisiert wurde. Des Weiteren wurde das Wasser vor der Verwendung noch einmal mit einem Millipak 100 (Millipore)-Filter mit einer Porengröße von 0.22 µm vorfiltriert.

2.1 Beschreibung der Inbetriebnahme der Wasserkocher analog der jeweiligen Bedienungsanweisungen

Vor Durchführung der Messungen wurden alle Wasserkocher entsprechend der Angaben in den jeweiligen Bedienungsanleitungen vorbehandelt und gereinigt. Für die jeweiligen Wasserkocher wurden folgende Schritte hierzu durchgeführt (Tabelle 3):

2.2 Versuchsbeschreibung

Nach der anleitungensprechenden Reinigung der Wasserkocher wurde jeder Wasserkocher für die Erstellung der realen Proben zu ca. 70 % der maximalen Füllmarke (OK, Braun, Philips, CIATRONIK: ca. 1,25 l, Emerio: ca. 0,75l) mit partikelfreiem Wasser befüllt. Vor jeder Füllung wurden vorher 100 ml Wasser als Blindprobe abgefüllt. Das Wasser wurde im Wasserkocher gekocht und nach einer kurzen Abkühlzeit wurden 100 ml aus dem Wasser als Probe entnommen. Das restliche Wasser im Wasserkocher wurde verworfen. Dieser Vorgang wurde für jeden Wasserkocher dreimal wiederholt, so dass sich für jeden Wasserkocher insgesamt 6 Proben ergeben haben (3x Blank, 3x Probe). Insgesamt wurden somit 30 Proben gemessen.

2.3 Analytische Bestimmungen der Partikelkonzentration mittels dynamischer Bildanalyse

Für die Bestimmung der Partikelzahlen in den einzelnen Proben wurde ein dynamisches Bildanalyse-System vom Typ FLOWCAM 8400 der Firma Fluid Imaging Technologies verwendet. Bei diesem System handelt es sich um eine Kombination

aus einem optischen Mikroskop und einem Durchflusszytometer. Durch ein optisches System, welches an eine Digitalkamera gekoppelt ist, werden alle Partikel in einem definierten Probenvolumen erfasst, welche in einem festgelegten Zeitraum eine Glas-Durchflusszelle passieren (Abb. 1).

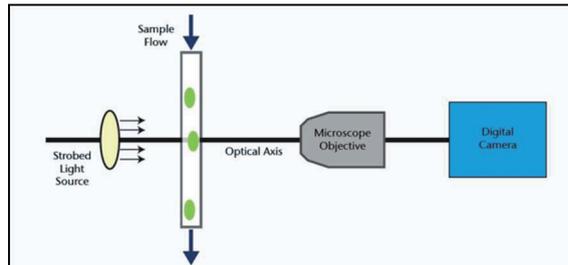


Abbildung 1: Aufbau der Messapparatur bei der dynamischen Bildanalyse (Quelle: Fluid Imaging Technologies)

Bis zu 10.000 Bilder können pro Minute vom System erfasst werden und man erhält ein digitales Bild von jedem detektierten Partikel sowie über 30 unterschiedliche Parameter zur Beschreibung der Größe und der Morphologie der Partikel. Des Weiteren erhält man eine statistische Auswertung über die Partikelgrößenverteilung und die Partikelkonzentration pro Milliliter (s. Abb. 2).

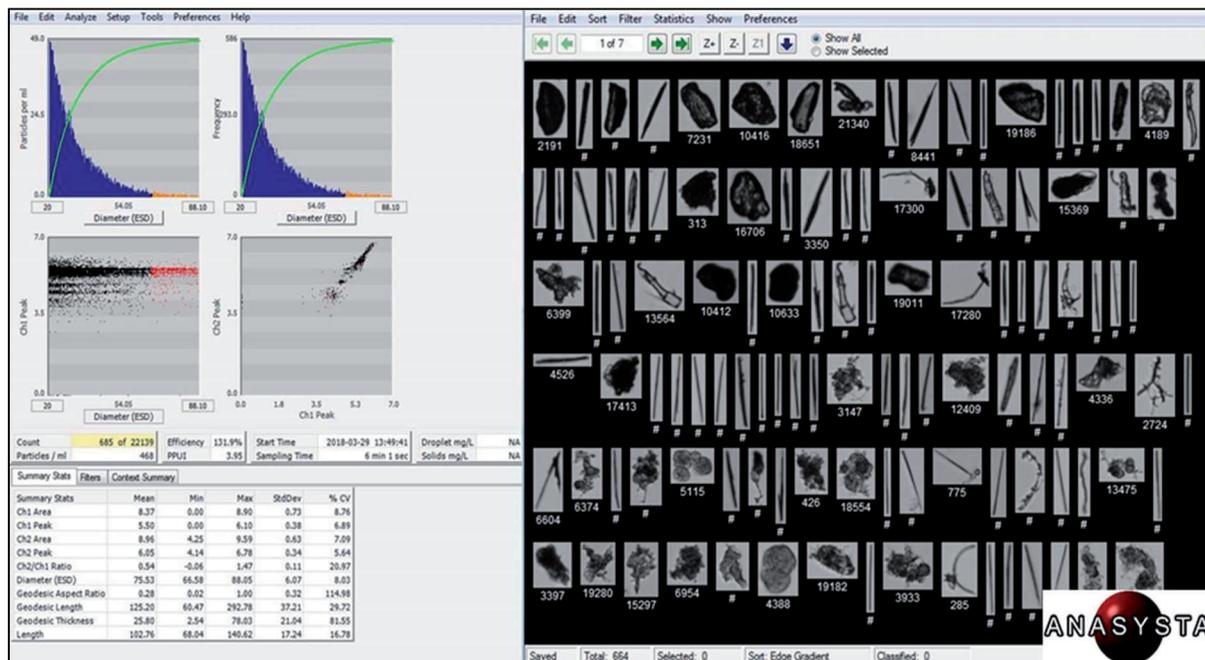


Abbildung 2: Darstellung der Messergebnisse mit Visual Spreadsheet®. Im Histogramm auf der linken Seite wurden nur die größten Partikel ausgewählt (rot markiert). Im rechten Fenster werden die Bilder dieser markierten Partikel dargestellt (Quelle: Anasysta e.K.)

Die FlowCam 8400 lässt sich mit vier unterschiedlichen Objektiven ausstatten, wodurch eine Analyse von Partikeln in einem Größenbereich zwischen 1 und 1000 µm möglich ist. Für die durchgeführten Versuche wurde ein 10x-Objektiv und eine Durchflusszelle mit einer definierten Breite von 80 µm verwendet. Von jeder Probe wurde ein Probenvolumen von 1 ml mit einer Durchflussgeschwindigkeit von 0.2 ml/Minute analysiert, wodurch sich für jede Messung eine Messdauer von 5 Minuten ergibt. Vor jeder Messung wurde die Durchflusszelle mit 2 ml partikelfreiem Wasser und 2 ml Probe durchgespült. Nach den Messungen wurden die Proben luftdicht verschlossen und dunkel und gekühlt gelagert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Der Kunststoff-innenverkleidete Wasserkocher von OK. zeigt eine zunehmende Tendenz zur Partikel-emission mit der Anzahl der Kochzyklen. Die anderen Wasserkocher auf Kunststoffbasis weisen schwankende Werte auf. Die gemessenen Daten sind in Tab. 4 zusammengefasst. Es fällt auf, dass die Mehrheit der Teilchen (P) im Größenbereich <10 µm liegt.

Der Wasserkocher von Emerio hat die niedrigste Partikelfreisetzung unter den Kunststoffkesseln mit gemessenen Werten zwischen 3779 - 10433 Partikeln (P)/ml. Der Braun-Wasserkocher, der zwischen 12294 bis 16396 P/ml liefert, erreicht deutlich höhere Werte, gefolgt vom Phillips-Kessel mit 14610 bis 20936 P/ml.

Der OK.-Wasserkocher gab im ersten Durchlauf nur 5297 P/ml ab, die Werte stiegen jedoch auf den Maximalwert von 29194 P/ml in den folgenden Durchläufen an. Mit einem Gesamtvolumen von 0,75-1,25 l ist die Gesamtzahl der Partikel alarmierend hoch. Ein Minimum von 5 Millionen Partikeln im Emerio-Wasserkocher im ersten Siedezyklus und ein Maximum von 33 Millionen Partikeln im OK.-Wasserkocher im dritten Kochzyklus wurden beobachtet. Im Vergleich dazu enthält der CIATRONIC-Wasserkocher aus Glas und Metall deutlich niedrigere Teilchenzahlen von 578 bis 1351 P/ml. Außerdem konnte keine Veränderung der Partikelabgabe über die Zeit beobachtet werden. Die Unterschiede zwischen dem Glaskessel und den Kunststoffkesseln sind in Abb. 3 dargestellt.

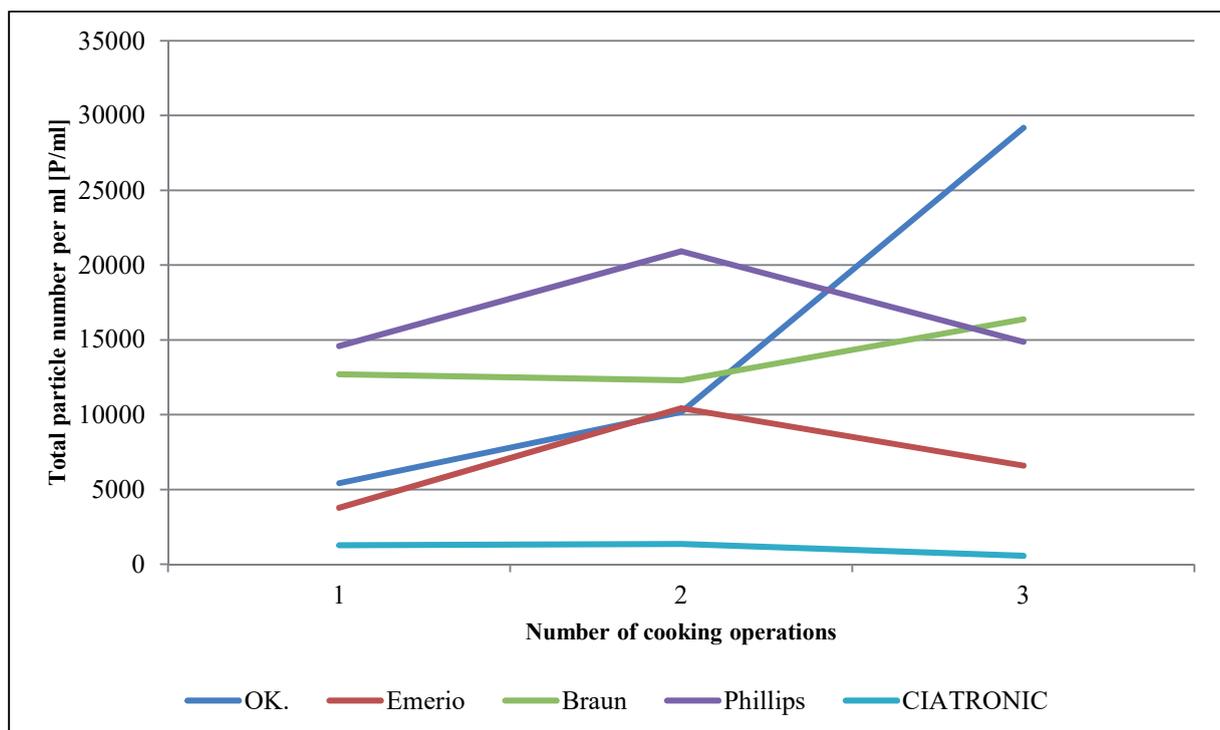


Abbildung 3: Anzahl der vom Wasserkocher abgegebenen Partikel pro Kochvorgang

Tabelle 4: Datenerfassung von Partikelanzahl und Verteilung pro Durchlauf (Nummer 1 – 3)

Durchlaufnummer und Hersteller	+50micron [ESD] P/ml	+25micron [ESD] P/ml	+10micron [ESD] P/ml	+5micron [ESD] P/ml	+2micron [ESD] P/ml	+1micron [ESD] P/ml	P/ml
OK.							
1	4	16	116	420	2665	2214	5435
2	0	1	34	153	4746	5262	10196
3	7	9	115	379	13588	15096	29194
OK. Blanks							
1	0	1	13	15	75	150	254
2	0	0	1	18	94	145	258
3	1	1	18	13	114	170	318
Emerio							
1	1	1	34	106	1180	2456	3779
2	0	0	23	73	4416	5920	10433
3	1	10	45	122	2770	3658	6607
Emerio Blanks							
1	0	0	6	15	104	110	235
2	0	0	4	12	65	113	194
3	0	0	0	4	85	214	304
Braun							
1	0	9	46	167	4890	7599	12711
2	0	9	51	178	3768	8288	12294
3	1	1	43	217	6320	9812	16396
Braun Blanks							
1	0	0	6	13	79	156	254
2	0	0	0	7	56	101	164
3	0	1	0	10	56	136	204
Phillips							
1	0	1	54	376	6665	7514	14610
2	3	9	68	348	7827	12682	20936
3	1	4	38	242	5031	9570	14888
Phillips Blanks							
1	0	1	6	10	79	126	223
2	0	0	1	12	65	97	175
3	1	1	4	4	75	175	261
CIATRONIC							
1	0	3	16	78	552	683	1281
2	0	1	16	97	490	747	1351
3	0	1	16	34	245	282	578
CIATRONIC Blanks							
5	0	0	3	6	126	139	274
6	0	1	6	9	97	128	241
7	0	0	4	12	63	85	164

Die gemessenen Blanks enthalten eine maximale Partikelanzahl von 304 P/ml, was eine geringe externe Kontamination der Proben zeigt. Die rein optische Partikeldetektion erlaubt keine eindeutige Identifizierung von Kunststoffen oder Polymeren. Da das Wasser in den Wasserkochern auf Kunststoffbasis jedoch ausschließlich mit deren Kunststoff in Kontakt kommt und die Blindproben kaum Partikelbelastung aufweisen, können andere Partikelquellen ausgeschlossen werden. Somit besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass es sich um Kunststoffpartikel handelt, die durch die thermische Belastung der Wasserkocher emittiert werden.

Die Ergebnisse des Wasserkochertests zeigen eine signifikant höhere Partikelerzeugungsrate nach dem Kochen des Wassers in Kesseln auf Kunststoffbasis.

Im Allgemeinen hängt die Beständigkeit gegen Abbau von der chemischen Zusammensetzung des Polymers ab. Beispielsweise sind Polymere wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), wie sie in den getesteten Warmwasserbereitern verwendet werden, selbst bei Raumtemperatur sehr anfällig für thermischen Abbau und können einem Abbau nur widerstehen, wenn sie mit UV-Stabilisatoren und Antioxidationsmitteln formuliert werden (Hakkarainen and Albertsson 2004, Beyler and Hirschler 2002, Kuroki et al. 1982, Gardette et al. 2013). Der allgemeine Mechanismus des thermooxidativen Abbaus von Polymeren ist bekannt und basiert auf einer typischen dreistufigen Radikalreaktion (Abbildung 4).

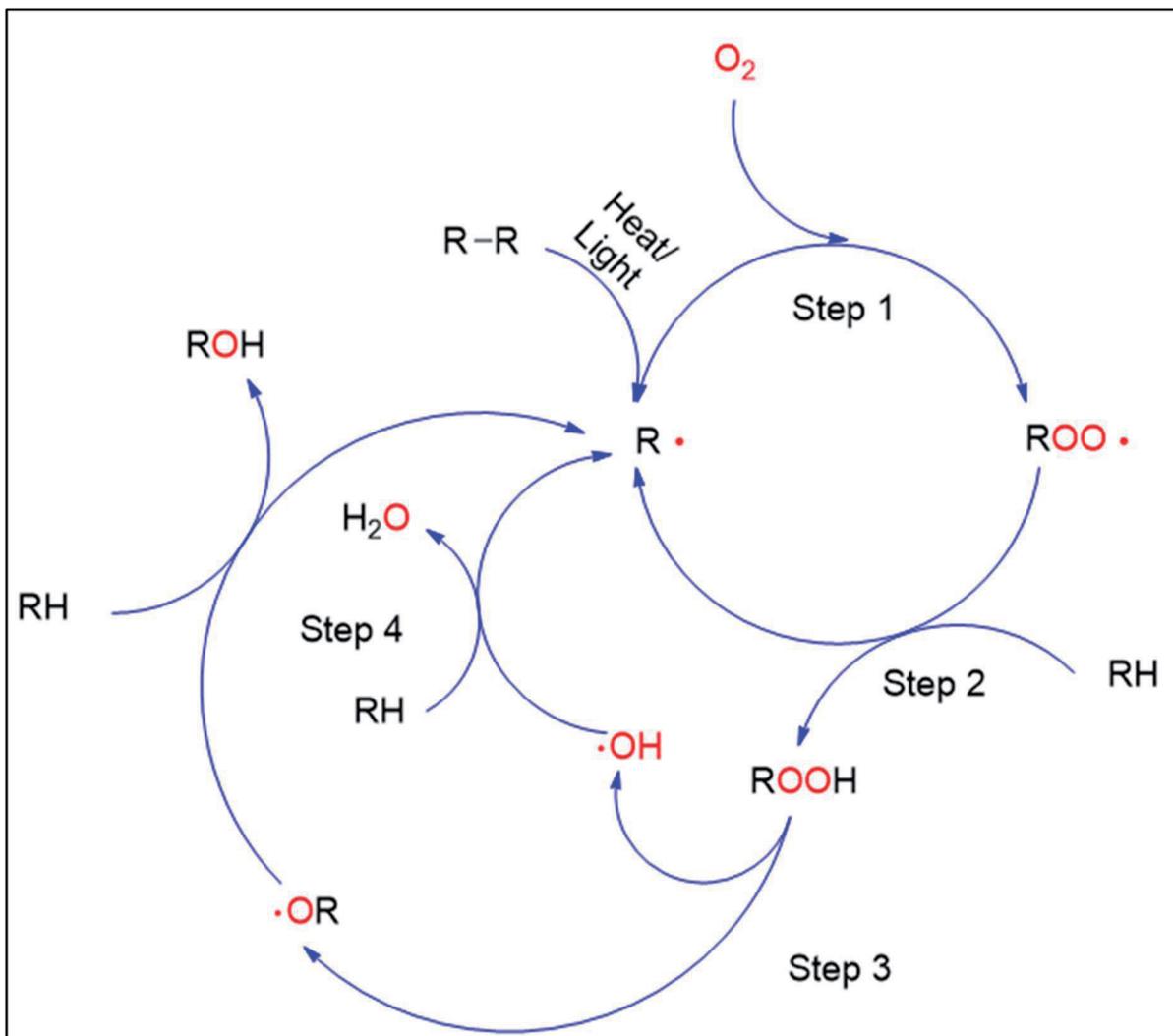


Abbildung 4: Darstellung des Mechanismus der Abbaureaktion durch thermische Zersetzung oder UV-Einfluss von Polymerverbindungen (z.B. PE oder PP (CROW polymerdatabase.com 2015))

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Untersuchungsergebnisse und den wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Polymeren und deren Verhalten bei Hitzekontakt oder unter UV-Einfluss sowie dem Wissen, dass bei der Aufnahme von Mikroplastik über die Nahrung schätzungsweise 90 % des aufgenommenen Mikroplastiks wieder ausgeschieden wird, ergeben sich aus den Partikelzahlen abschätzbare Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (Revel et al. 2018, EFSA CONTAM Panel 2016, Lusher et al. 2017, Galloway et al. 2017).

Entscheidender Faktor für den Transport im Säugetier ist die Größe des Partikels. Mikroplastikpartikel < 150 µm können potenziell über die Darmschleimhaut aufgenommen werden und in das Lymphsystem gelangen, Partikel < 110 µm können bereits über die Pfortader in den Blutkreislauf gelangen und Partikel < 20 µm werden über den Blutkreislauf verteilt und können von dort in die inneren Organe gelangen. Partikel < 100 nm können sogar ins Gehirn, die Geschlechtsorgane und über die Plazentaschranke in einen Fötus transportiert werden (Lusher et al. 2017). Allgemein gilt: Je kleiner die Partikel sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie in den Organismus aufgenommen werden (Wright and Kelly 2017). Die Aufnahmewahrscheinlichkeit wird zusätzlich von der Hydrophobie sowie der Ladung und Funktionalisierung der Partikeloberfläche bestimmt. Geringe Hydrophobie und negative Oberflächenladung führen zu einer höheren Aufnahme. Des Weiteren wird vermutet, dass sich durch die Anlagerung von Biomolekülen auf der Partikeloberfläche eine Proteinkorona bildet, welche das Aufnahme- und Transportverhalten im Körper ebenfalls stark beeinflusst (Wright and Kelly 2017, Iñiguez et al. 2017, Galloway et al. 2017).

Zusätzlich zu den Auswirkungen bei Aufnahme in den Organismus gilt es, den Effekt einzuschätzen, dass Mikroplastik Schadstoffe wie beispielsweise DDT, Dioxin oder Schwermetalle binden, transportieren und nach der Aufnahme in den Körper freisetzen kann (Bakir et al. 2014, Rochman et al. 2014). Auch enthalten die meisten Polymermischungen herstellungsbedingt schädliche Inhaltsstoffe wie Weichmacher oder Monomere, die einen direkten Einfluss auf den Organismus ausüben, da diese Stoffe

meist potenziell als gefährlich und/oder krebserregend eingestuft werden (Lithner et al. 2011, Bergmann et al. 2015). Bei einer Einbettung dieser Stoffe ins Gewebe kann es hier durch die Abgabe in das umliegende Gewebe zu einer lokal erhöhten Konzentration und punktuellen Schädigung kommen. Zu Gefahren von Mikroplastik als Fremdkörper im Gewebe gehören die Bildung von Läsionen und Entzündungen. Weiterhin können oxidativer Stress, Nekrosen und Schädigungen der DNA ausgelöst werden (Lusher et al. 2017). Zusätzlich sind neurologische Verhaltensstörungen möglich (Rafiee et al. 2018).

Um die Bildung und die Auswirkungen von Mikroplastik auf den Menschen und die Umwelt einzudämmen, gehört neben einer globalen Vermeidungsstrategie für Einwegplastikprodukte und Substitution von Kunststoffartikeln im Bereich des täglichen Bedarfs auch ein auf allen Ebenen entwickeltes (politisch, wirtschaftlich, wissenschaftlich) und vor allem für alle Menschen umsetzbares Recyclingkonzept, ebenso wie eine effiziente Entfernungsstrategie für wasserführende Systeme und Prozesse zu den aktuellen Lösungsansätzen (European Commission 2018, Herbort et al. 2018b, Sturm et al. 2018, Herbort et al. 2018a, Herbort and Schuhen 2016).

Danksagung

Die Forschungsprojekte von Wasser 3.0 (www.wasserdreinull.de) werden mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch die Bereitstellung von ZIM-Projektmitteln durchgeführt. Michael Sturm dankt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für das Promotionsstipendium.

Kontaktinformationen

Email: schuhen@wasserdreinull.de

Michael Toni Sturm, Katrin Schuhen: Wasser 3.0 / abcr GmbH, Im Schlehert 10, 76187 Karlsruhe, Deutschland, www.wasserdreinull.de

Sven Kluczka, Axel Wilde: Anasysta e.K., Brunshofstr. 6-8, 45470 Mülheim/Ruhr, Deutschland, www.anasysta.com

Original Veröffentlichung

Der Artikel wurde zuerst online veröffentlicht auf Analytik News:

<https://analytik.news/Fachartikel/2019/12.html>

Literatur

Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC (2014) Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987) 185:16–23. doi: 10.1016/j.envpol.2013.10.007

Barnes, D.K.A., Galgani F., Thompson RC., Barlaz, M. (2009) Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364(1526):1985–1998. doi: 10.1098/rstb.2008.0205

Bergmann M, Gutow L, Klages M (2015) Marine Anthropogenic Litter. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3

Beyler CL, Hirschler MM (2002) Thermal Decomposition of Polymers. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2* (Section 1, Chapter 7): 111–131

CHEManager (2018) Kunststoff-Stoffströme in Deutschland. <https://www.chemanager-online.com/news-opinions/grafiken/kunststoff-stoffstroeme-deutschland>. Accessed 26 Nov 2018

Consultic, IK, PlasticsEurope, BVSE, VDMA, BKV (2016) Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 – Kurzfassung. https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Consultic_2015__2_3.09.2016__Kurzfassung.pdf. Accessed 05 Jun 2018

Conversio Market & Strategy GmbH (2018) Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. https://www.bvse.de/images/news/Kunststoff/2018/181011_Kurzfassung_Stoffstrombild_2017.pdf. Accessed 26.22.2018

CROW polymerdatabase.com (2015) Thermal-Oxidative Degradation of Polymers. <https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Thermal%20Degradation.html>. Accessed 26. Nov. 2018

Eerkes-Medrano D, Thompson RC, Aldridge DC (2015) Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and

prioritisation of research needs. *Water Research* 75:63–82. doi: 10.1016/j.watres.2015.02.012

EFSA CONTAM Panel (2016) Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSJ* 14(6):30 pp. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4501

Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, Borerro JC, Galgani F, Ryan PG, Reisser J (2014) Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PloS one* 9(12): e111913. doi: 10.1371/journal.pone.0111913

European Commission (2018) A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. COM (2018) 28 final, Brussels

Galloway TS, Cole M, Lewis C (2017) Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature ecology & evolution* 1(5):116. doi: 10.1038/s41559-017-0116

Gardette M, Perthue A, Gardette J-L, Janecska T, Földes E, Pukánszky B, Therias S (2013) Photo- and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content. *Polymer Degradation and Stability* 98(11):2383–2390. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.017

Geyer R, Jambeck JR, Law KL (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3(7):e1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782

Hakkaraianen M, Albertsson A-C (2004) Environmental Degradation of Polyethylene. In: Albertsson A-C (ed) *Long Term Properties of Polyolefins*, vol 169. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 177–200

Herbort AF, Schuhen K (2016) A concept for the removal of microplastics from the marine environment with innovative host-guest relationships. *Environmental Science and Pollution Research* (24(12)): 1–5. doi: 10.1007/s11356-016-7216-x

Herbort AF, Sturm MT, Fiedler S, Abkai G, Schuhen K (2018a) Alkoxy-silyl Induced Agglomeration: A New Approach for the Sustainable Removal of Microplastic from Aquatic Systems. *J Polym Environ* 62(8):1–13. doi: 10.1007/s10924-018-1287-3

Herbort AF, Sturm MT, Schuhen K (2018b) A new approach for the agglomeration and subsequent removal of polyethylene, polypropylene, and mixtures of both from freshwater systems - a case study. *Environmental science*

- and pollution research international (25(15)):15226–15234. doi: 10.1007/s11356-018-1981-7
- Hüthig GmbH (2017) Plasticseurope: Kunststoff weithin beliebt. <https://www.plastverarbeiter.de/66675/plasticseurope-kunststoff-weithin-beliebt/#>. Accessed 26 Nov 2018
- Iñiguez ME, Conesa JA, Fullana A (2017) Microplastics in Spanish Table Salt. *Scientific reports* 7(1): 8620. doi: 10.1038/s41598-017-09128-x
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL (2015) Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* (New York, N.Y.) 347(6223):768–771. doi: 10.1126/science.1260352
- Kuroki T, Sawaguchi T, Niikuni S, Ikemura T (1982) Mechanism for long-chain branching in the thermal degradation of linear high-density polyethylene. *Macromolecules* 15(6):1460–1464. doi: 10.1021/ma00234a002
- Law KL, Thompson RC (2014) Oceans. Microplastics in the seas. *Science* (New York, N.Y.) 345(6193):144–145. doi: 10.1126/science.1254065
- Liebezeit G, Liebezeit E (2013) Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment* 30(12):2136–2140. doi: 10.1080/19440049.2013.843025
- Liebezeit G, Liebezeit E (2014) Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food additives & contaminants. Part A, Chemistry, analysis, control, exposure & risk assessment* 31(9): 1574–1578. doi: 10.1080/19440049.2014.945099
- Lithner D, Larsson A, Dave G (2011) Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *The Science of the total environment* 409(18): 3309–3324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.038
- Lusher A, Hollman PCH, Mendoza-Hill J (2017) Microplastics in fisheries and aquaculture. Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, vol 615. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- Mason SA, Welch VG, Neratko J (2018) Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Frontiers in chemistry* 6:407. doi: 10.3389/fchem.2018.00407
- Mintenig S, Gerdt G Dr., Löder M Dr. (2014) Abschlussbericht Mikroplastik in Trinkwasser. Untersuchung im Trinkwasserversorgungsgebiet des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie
- PlasticsEurope (2016) *Plastics – the Facts 2015*. An analysis of European plastics production, demand and waste data, Brussels, Belgium: Association of Plastics Manufacturers
- Prata JC (2018) Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987) 234:115–126. doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.043
- Rafiee M, Dargahi L, Eslami A, Beirami E, Jahangiri-Rad M, Sabour S, Amereh F (2018) Neurobehavioral assessment of rats exposed to pristine polystyrene nanoplastics upon oral exposure. *Chemosphere* 193:745–753. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.076
- Revel M, Châtel A, Mouneyrac C (2018) Micro(nano)plastics. A threat to human health? *Current Opinion in Environmental Science & Health* 1:17–23. doi: 10.1016/j.coesh.2017.10.003
- Rochman CM, Hentschel BT, Teh SJ (2014) Long-term sorption of metals is similar among plastic types: implications for plastic debris in aquatic environments. *PloS one* 9(1): e85433. doi: 10.1371/journal.pone.0085433
- Statista (2018) Global plastic production from 1950 to 2016. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>. Accessed 25 Nov 2018
- Sturm MT, Wilde A, Kluczka S, Schuhen K (2018) Detektion von Mikroplastik im (Ab-)Wasser – Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen? *Analytik-News – Das Online-Labormagazin* (6): 1–6
- Umweltbundesamt (2017) *Kunststoffabfälle*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#textpart-1>. Accessed 26 Nov 2018
- Wright SL, Kelly FJ (2017) Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental science & technology* 51(12):6634–6647. doi: 10.1021/acs.est.7b00423
- Wright SL, Thompson RC, Galloway TS (2013) The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution* 178:483–492. doi: 10.1016/j.envpol.2013.02.031